

УДК 621.914

**С.І. СЕРБІН**, д-р техн. наук; проф. Національного університета кораблебудування, Миколаїв;

**Г.Б. МОСТІПАНЕНКО**, канд. техн. наук; Національний університет кораблебудування, Миколаїв;

**А.В. КОЗЛОВСЬКИЙ**, магістр Національного університета кораблебудування, Миколаїв

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ НЕСТАЦІОНАРНОГО ГОРІННЯ В КАМЕРІ ЗГОРЯННЯ ГТД**

Проведен анализ нестационарных процессов горения в низкоэмиссионной камере сгорания ГТД с помощью числового эксперимента с использованием разных подходов к моделированию турбулентности.

Проведено аналіз нестационарних процесів горіння в низькоемісійній камері згоряння ГТД за допомогою числового експерименту з використанням різних підходів до моделювання турбулентності.

The numerical analysis of unsteady combustion process in low emission gas turbine combustion chamber with different turbulence models was made.

**Вступ.** Внаслідок посилення вимог щодо екологічних і економічних показників нові газотурбінні двигуни повинні мати істотно вищу економічність при нижчих питомих викидах шкідливих речовин у відпрацьованих газах. Одним з основних шляхів зменшення викидів, зокрема оксидів азоту, є зменшення максимальної температури горіння в жаровій трубі. Досягається таке зниження за рахунок збіднення та попереднього перемішування паливо-повітряної суміші. Однак, не дивлячись на те, що такі камери згоряння демонструють непогані результати за рівнем шкідливих викидів [1, 2], в таких конструкціях є недолік, обумовлений фізикою горіння бідних сумішей. Це – виникнення режимів вібраційного горіння. Таке явище також називають нестійким горінням, термічним збудженням звуку, термоакустичними коливаннями, пульсуючим горінням [3].

В камерах згоряння (КЗ) газотурбінних двигунів потужні коливання призводять до часткового або повного руйнування елементів конструкції, знижують надійність їх роботи. Внаслідок інтенсифікації теплообміну в ряді випадків спостерігається прогоряння різних елементів камери згоряння. Тому забезпечення стійкості процесу горіння є серйозною та актуальною задачею, що вимагає великих матеріальних витрат і займає значну частину часу при доводочних випробуваннях двигунів [4]. Використання числового експерименту для прогнозування режимів вібраційного горіння на етапі розробки двигуна дозволить значно скоротити такі витрати.

Основна причина виникнення вібраційного горіння – чутливість сумішоутворення та горіння до коливань тиску газу в камері згоряння, які супроводжуються різким збільшенням шуму та зривами полум'я.

Коливання тиску при вібраційному горінні в низькоемісійних камерах згоряння ГТУ відбуваються внаслідок залежності коливань витрати повітря на впуску камери згоряння і палива в паливній магістралі від коливань тепловиділення в камері згоряння, які призводять до флуктуацій коефіцієнта надлишку повітря.

Числовий експеримент дає можливість прогнозувати такі коливання шляхом моделювання тривимірних хімічнореагуючих турбулентних потоків і визначну роль при цьому відіграє вибір підходу до моделювання турбулентності.

**Математична модель.** Відзначимо основні підходи до числового моделювання нестационарних процесів турбулентності:

1 *Пряме числове моделювання* (Direct Numerical, *DNS*). У рамках цього підходу кількісно розв'язуються системи алгебраїчних рівнянь, які з високою точністю апроксимують вихідну систему диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса. *DNS* – найточніший метод, який вимагає детального просторово-часового розв'язання і веде до великих обчислювальних витрат. Тому *DNS*-підхід рідко застосовується на практиці [5].

2 *Розв'язання систем рівнянь, осереднених за Рейнольдсом* (Reynolds Averaged Navier-Stokes, *RANS*). У даному випадку модель відтворює тільки середні значення швидкості, а вплив всіх флуктуацій враховується за допомогою турбулентних замикань. Можлива побудова нестационарної моделі *RANS* (Unsteady *RANS* – *URANS*) [6]. Цей підхід має високу економічність і в багатьох випадках забезпечує цілком прийнятну точність розрахунку. Але для широкого кола турбулентних течій результати, отримані з його допомогою, виявляються незадовільними [5, 6].

3 *Моделювання методом великих вихорів* (Large Eddy Simulation, *LES*). Основою цього метода є гіпотеза про незалежність статистичних характеристик великомасштабних турбулентних рухів від молекулярної в'язкості. Згідно з цим припущенням можлива побудова числової моделі, яка описує нестационарну динаміку тільки відносно великих вихорів, при цьому обчислювальні витрати, необхідні для реалізації такої моделі, не повинні залежати від числа Рейнольдса, оскільки немає необхідності явно і точно розраховувати всі дрібні вихори [6]. Ця модель була обрана для подальших розрахунків камери згоряння.

Керуючі рівняння для *LES*-моделі отримують в результаті фільтрації нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса. В процесі фільтрації відсіваються вихори, масштаб яких менше критерію фільтрації або розміру кінцевого елементу розрахункової сітки. Таким чином, остаточні рівняння керують динамікою великих вихорів. Отримані рівняння Нав'є-Стокса мають вигляд:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho} \bar{u}_i) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho} \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j}, \\ \sigma_{ij} &= \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_l} \delta_{ij}, \\ \tau_{ij} &= \overline{\rho u_i u_j} - \bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j,\end{aligned}$$

де  $\sigma_{ij}$  – тензор тисків від молекулярної в'язкості;  $\tau_{ij}$  – підсітковий масштаб напруг.

Підсітковий масштаб напруг, отриманий в результаті операції фільтрації, вимагає моделювання. Для цього використовується гіпотеза Буссінеска [7], яка дозволяє розрахувати масштаб турбулентних напруг за формулою:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = 2 \mu_t \bar{S}_{ij},$$

де  $\mu_t$  – підсітковий масштаб турбулентної в'язкості;  $\bar{S}_{ij}$  – тензор напруг для вибраного масштабу, який визначається виразом:

$$\bar{S}_{ij} \equiv \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right).$$

Турбулентна в'язкість визначається за формулою [8]:

$$\mu_t = \rho L_s^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{5/2} + (\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{5/4}},$$

де величини  $L_s$  і  $S_{ij}^d$  розраховуються таким чином:

$$L_s = \min(kd, C_w V^{1/3}),$$

$$S_{ij}^d = \frac{1}{2} (\bar{g}_{ij}^2 + \bar{g}_{ji}^2) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \bar{g}_{kk}^2, \quad \bar{g}_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}, \quad \bar{g}_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}.$$

**Результати досліджень.** В даній роботі виконано розрахунок нестаціонарних характеристик низькоемісійної камери згоряння газотурбінного двигуна потужністю 32 МВт, прототипом якої є камера згоряння двигуна потужністю 25 МВт виробництва ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» [9]. Для числового моделювання нестаціонарного горіння в низькоемісійній камері згоряння ГТД використовувалась кінцево-елементна модель 1/16 частини камери, що складається з 3 млн. полігедральних елементів. Використання полігедральної сітки при нестаціонарних числових експериментах дозволяє пришвидшити процес збіжності числового рішення диференціальних рівнянь за рахунок підвищення якості елементів та збільшення кількості вузлів кожного елемента порівняно з тетраедричним представленням.

Часовий проміжок (0,001 с) для інтегрування диференціальних рівнянь нестаціонарних моделей турбулентності прийнято згідно рекомендацій до даних моделей та міркувань економії ресурсів та машинного часу.

Розрахунки нестаціонарного процесу горіння в низькоемісійній камері згоряння ГТД потужністю 32 МВт проводилися для триреакційного механізму горіння газоподібного палива [10], який добре зарекомендував себе у стаціонарних розрахунках [11].

З графіка пульсацій максимальної температури у жаровій трубі (рис. 1а) видно, що її амплітуда дорівнює 22,5 %. Осереднене значення максимальної температури, розраховане в результаті числового експерименту, складає 2047 К і відповідає значенню теоретичної температури горіння 2010 К, розрахованої для коефіцієнта надлишку повітря 1,55 в первинній зоні камери згоряння за методикою [12]. Одночасно з цим помітно (див. рис. 1б), що пульсації температур у вихідному перерізі складають лише  $\pm 1,5$  %.

З рисунку 2 можна побачити локалізацію максимальних амплітуд пульсацій поля температур, що знаходяться в зоні витoku повітря крізь центральний канал завіхрювача 1, в зонах витoku повітря з периферійного каналу завіхрювача 2 і зонах струменів вторинного повітря 3.

Пульсації температури відбуваються за рахунок нерівномірності змішування паливо-повітряної суміші, оскільки пульсації потоку повітря після компресора на вході в камеру не моделювалися.

Аналізуючи графіки пульсації повного тиску, наведені на рис. 3 для вихідного перерізу жарової труби, можна зробити висновки, що амплітуда пульсацій

усередненого повного тиску приблизно складає  $\pm 7$  кПа ( $\pm 16,5$  %). Отримані амплітуди пульсацій менше небезпечних, що свідчить про відсутність імовірності виникнення вібраційного горіння на номінальному режимі роботи камери.

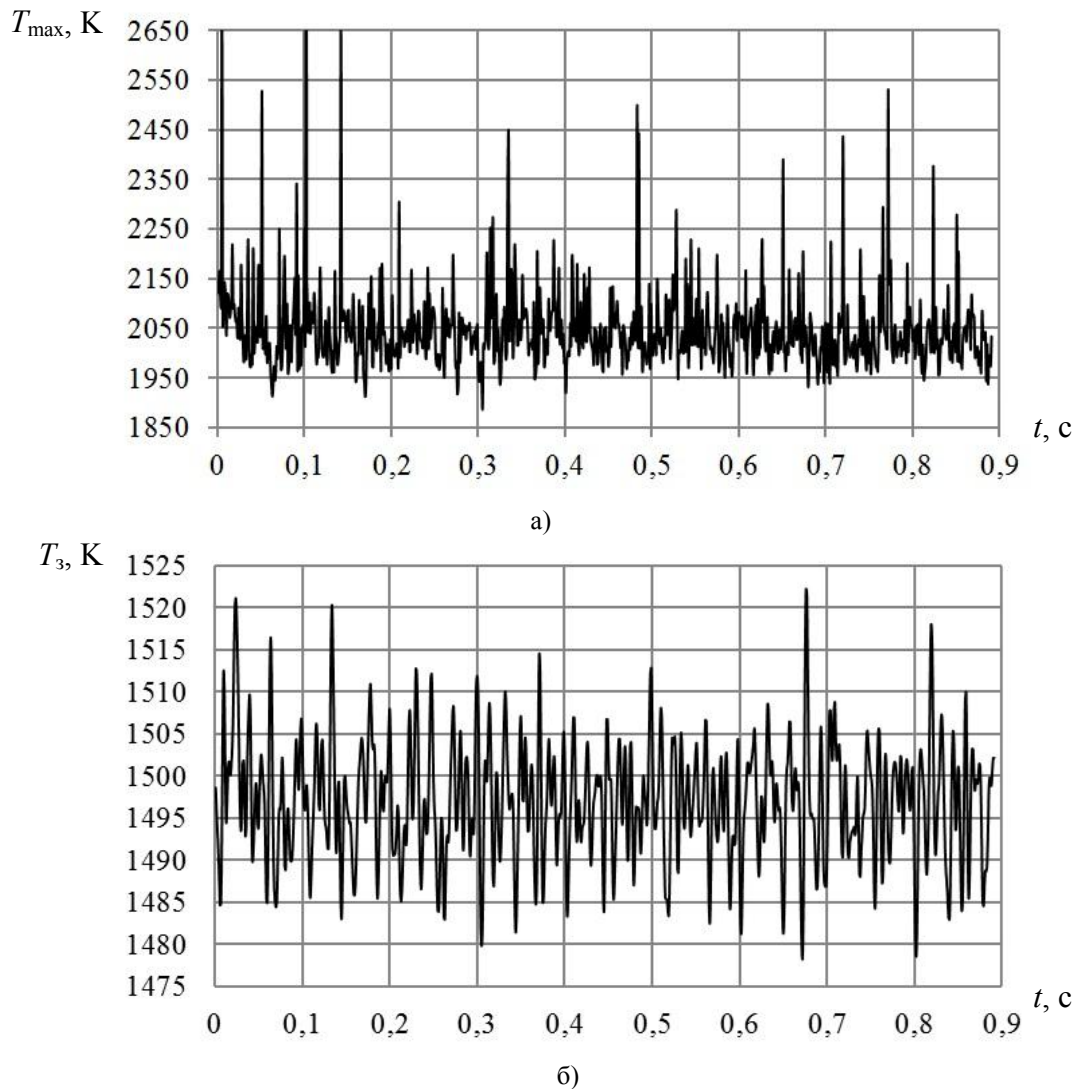


Рис. 1. Пульсації максимальної температури в об'ємі жарової труби (а) та осередненої температури у вихідному перерізі (б)

Також в результаті числового експерименту отримані залежності концентрацій оксидів вуглецю на виході низькоемісійної камери згоряння від часу. Утворення та розкладання СО залежить від швидкостей хімічних реакцій, які, в свою чергу, визначаються рівнем турбулентності. Отже їх коректний розрахунок з врахуванням пульсацій за допомогою *LES*-моделі турбулентності дозволив отримати осередненні за часом викиди оксидів вуглецю у вихідному перерізі жарової труби, рівень яких складає 100 ppm, що також відповідає нормам на емісію СО. На рис. 4 представлено поле концентрацій оксидів вуглецю у жаровій трубі, усереднене за часом. Максимальні значення концентрацій оксиду вуглецю спостерігаються в районі виходу паливо-повітряної суміші з центрального завихрювача пальникового пристрою, а також в районі стінок жарової труби (2 і 3 охолоджувані обичайки).

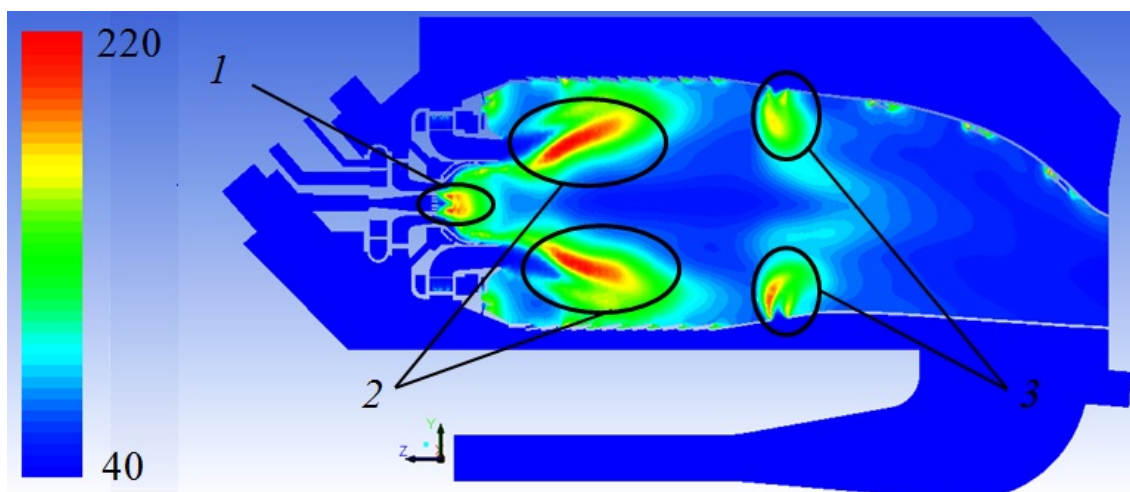


Рис. 2. Середньоквадратичні відхилення температури в поздовжньому перерізі жарової труби

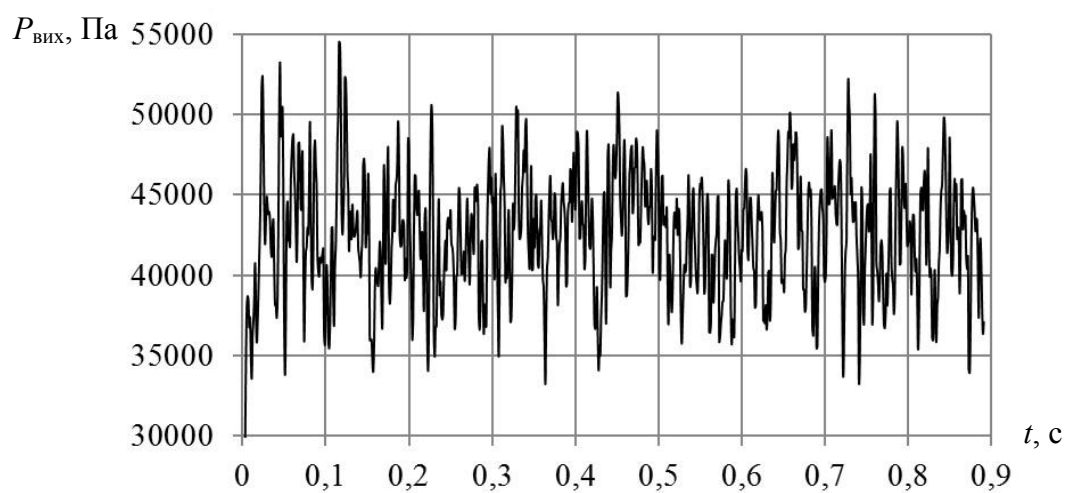


Рис. 3. Графік пульсацій тиску у вихідному перерізі жарової труби

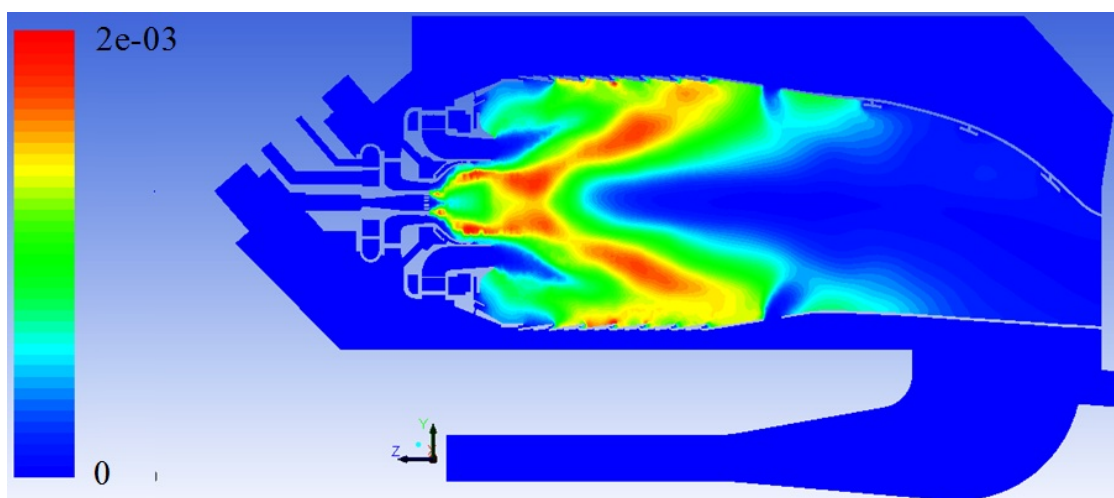


Рис. 4. Поле концентрацій оксидів вуглецю, усереднене за часом

**Висновки.** Використання *RANS*-підходу до моделювання в стаціонарному числовому експерименті не передбачає пульсації полум'я (температури). Оцінити стабільність горіння можливо лише при *LES*-підході до моделювання, що підтверджують і закордонні джерела [13].

Виявлено, що для аналізу нестационарних процесів горіння з урахуванням складних геометричних форм сучасних камер згоряння доцільно використовувати полігедральну кінцево-елементну модель.

За результатами виконаного числового експерименту низькоемісійної камери згоряння ГТД визначені пульсації тисків, концентрацій хімічних компонентів та температур та отримані осереднені за часом основні характеристики камери згоряння. Все це дозволить адекватно оцінити стабільність роботи камери на номінальному режимі, а також більш коректно визначати її параметри порівняно зі стаціонарними розрахунками.

**Список літератури:** 1. *Сербин, С.И.* Экспериментальное исследование гибридной камеры сгорания газотурбинного двигателя мощностью 15 МВт [Текст] / С.И. Сербин, В.Г. Ванцовский, В.В. Вилкул // Збірник наукових праць національного університету кораблебудування. – Миколаїв : НУК, 2004. – № 2 (395). – С. 89-95. 2. Состояние отработки малоэмиссионных камер сгорания ГТД наземного применения семейства «НК» [Электронный ресурс] / [В.В. Беляев, В.Н. Лавров, А.М. Постников и др.] // Первый межведомственный научно-технический семинар по проблемам низкоэмиссионных камер сгорания газотурбинных установок. – 2004. – Режим доступа: <http://www.sonbi.ru/tsiam/conf/lemission/doc/06.pdf>. – Заголовок с экрана. 3. *Налісний, М.Б.* Вібраційне горіння в низькоемісійних камерах згоряння газотурбінних установок [Електронний ресурс] / М.Б. Налісний // Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. – 2007 – 2 с. – Режим доступу: WWW. URL: <http://referatu.com.ua/referats/7569/172429/>. – Дата звернення: 2011. – Заголовок з екрану. 4. *Ларионов, В.М.* Автоколебания газа в установках с горением [Текст] / В.М. Ларионов, Р.Г. Зарипов. – Казань: Издательство Казанского государственного технического университета, 2003. – 227 с. 5. *Глазунов, А.В.* Вихреразрешающее моделирование как один из методов описания турбулентных течений [Электронный ресурс] / А.В. Глазунов // Электронный журнал. МГУ – 2007. – 4 с. – Режим доступа: WWW. URL <http://geophys.srcc.msu.ru/direct2.htm>. – Дата обращения: 2011. – Заголовок с экрана. 6. *Белов, И.А.* Моделирование турбулентных течений [Текст] / И.А. Белов, С.А. Исаев. – Балт. гос. техн. ун-т. СПб. – 2001. – 108 с. 7. *Hinze, J.O.* *Turbulence* / J.O. Hinze. – McGraw-Hill Publishing Co.: New York, 1975. – 790 p. 8. *Nicoud, F.* Subgrid-Scale Stress Modelling Based on the Square of the Velocity Gradient Tensor [Text] / F. Nicoud, F. Ducros // *Flow, Turbulence, and Combustion*. – 1999. – No. 62(3). – P. 183-200. 9. *Бондин, Ю.И.* Основные результаты опытно-промышленной эксплуатации ГТД ДН80Л на КС «Софиевская» [Текст] / Ю.И. Бондин, А.Б. Михайлов // Судовое и энергетическое газотурбостроение. – Т. 1. – Николаев: НПКГ «Зоря»-«Машпроект», НО ИАУ, 2004. – С. 7-16. 10. *Karl, V. Meredith* Automated Global Mechanism Generation for use in CFD Simulations [Text] / Karl V. Meredith, David L. Black // 44-th AIAA-Paper. – Reno, Nevada, 2006. – P. 1-13. 11. *Мостипаненко, А.Б.* Повышение экологической безопасности газотурбинных установок использованием технологии малоэмиссионного сжигания топлив [Текст] / А.Б. Мостипаненко // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2007. – №1 (412). – С. 100-108. 12. *Романовський, Г.Ф.* Камери згоряння суднових газотурбінних двигунів [Текст]: навч. посібник / Г.Ф. Романовський, С.І. Сербін. – Миколаїв: УДМТУ, 2000. – 259 с. 13. *Sandeep, Jella* CFD Predictions Of CO Emission Trends In An Industrial Gas Turbine Combustor [Text] / Sandeep Jella, Pierre Gauthier, Marius Paraschivoiu // ASME, 2010. – GT2010-23196. – 10 p.

© Сербін С.І., Мостіпаненко Г.Б., Козловський А.В., 2012  
Надійшла до редколегії 05.02.12